



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2020

Zukünftige Veränderungen des Wasserangebotes im Lötschental

Nyfeler, Matthias ; Frey, Holger ; Huggel, Christian

Abstract: Aufgrund der Empfindlichkeit der Gebirgsregionen sind Alpentäler stark von der Klimaveränderung betroffen. Während die Temperaturen steigen und sich das Niederschlagsbild verändert, beeinflussen auch die abschmelzenden Gletscher die Wasserversorgung der alpinen Regionen. Basierend auf zwei Einzugsgebieten des Hauptflusses Lonza wird die Wasserverfügbarkeit im Lötschental in monatlicher Auflösung modelliert und durch die Parameter Regen, Schneeschmelze, Gletscherschmelze und Evapotranspiration definiert. Das Modell basiert auf der vorhandenen Gletscherfläche und auf stündlichen Messwerten von Temperatur und Niederschlag. Die Zukunftsprognosen bis Ende des 21. Jahrhunderts werden anhand der RCPSzenarien 2.6, 4.5 und 8.5 berechnet. Verglichen mit dem Wasserverbrauch kann anschliessend eine Aussage über eine mögliche Wasserverknappung gemacht werden. Die Resultate zeigen dabei eine starke Abhängigkeit von den Eismassen. Sie sind heute für 46 % des gesamten Abflusses des Lötschentals verantwortlich, wobei das pessimistische RCP8.5-Szenario Abflusseinbrüche von etwa -45% für die Lonza und bis zu -75% für die Nebenflüsse erwarten lässt. Eine spezifische zukünftige Wasserknappheit konnte, basierend auf der monatlichen Auflösung des Modells, nicht direkt erkannt jedoch interpretiert werden.

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-195716>

Journal Article

Published Version

Originally published at:

Nyfeler, Matthias; Frey, Holger; Huggel, Christian (2020). Zukünftige Veränderungen des Wasserangebotes im Lötschental. *Wasser Energie Luft*, 112(3):183-189.

Zukünftige Veränderungen des Wasserangebotes im Lötschental

Matthias Nyfeler, Holger Frey, Christian Huggel

Zusammenfassung

Aufgrund der Empfindlichkeit der Gebirgsregionen sind Alpentäler stark von der Klimaveränderung betroffen. Während die Temperaturen steigen und sich das Niederschlagsbild verändert, beeinflussen auch die abschmelzenden Gletscher die Wasserversorgung der alpinen Regionen. Basierend auf zwei Einzugsgebieten des Hauptflusses Lonza wird die Wasserverfügbarkeit im Lötschental in monatlicher Auflösung modelliert und durch die Parameter Regen, Schneeschmelze, Gletscherschmelze und Evapotranspiration definiert. Das Modell basiert auf der vorhandenen Gletscherfläche und auf stündlichen Messwerten von Temperatur und Niederschlag. Die Zukunftsprognosen bis Ende des 21. Jahrhunderts werden anhand der RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und 8.5 berechnet. Verglichen mit dem Wasserverbrauch kann anschliessend eine Aussage über eine mögliche Wasserverknappung gemacht werden. Die Resultate zeigen dabei eine starke Abhängigkeit von den Eismassen. Sie sind heute für 46 % des gesamten Abflusses des Lötschentals verantwortlich, wobei das pessimistische RCP8.5-Szenario Abflusseinbrüche von etwa –45% für die Lonza und bis zu –75% für die Nebenflüsse erwarten lässt. Eine spezifische zukünftige Wasserknappheit konnte, basierend auf der monatlichen Auflösung des Modells, nicht direkt erkannt jedoch interpretiert werden.

availability in the Lötschental, Valais», eingereicht am Geographischen Institut der Universität Zürich im April 2019. Sie behandelt folgende Forschungsfragen:

- Aus welchen Zuflüssen setzt sich der Gesamtabfluss der Lonza zusammen und wie sieht deren prozentuale Verteilung aus?
- Wie verändert sich dieser Abfluss in der Zukunft?
- Existiert die Möglichkeit einer Wasserverknappung in den Sommermonaten?

Der zweite Teil der Arbeit, welcher in diesem Artikel nicht weiter behandelt wird, befasst sich mit der geomorphologischen Untersuchung der Südseite des Lötschentals und den Fragen zur Auswirkung der Gletscherschmelze auf die Mobilisierung, Stabilisierung und Destabilisierung von grossflächigen Schuttvorkommen. Die gesamte Arbeit ist online verfügbar.

1. Einführung

Basierend auf den Analysen von MeteoSchweiz war das Jahr 2018 in klimatologischer Hinsicht überdurchschnittlich warm und trocken (*MeteoSchweiz, 2019*). Ein Jahr, welches als Indikator für zukünftige Entwicklungen herbeigezogen werden kann und durch die Prognosen der Klimaszenarien von CH2018 eine anschauliche Perspektive für zukünftige Sommer in der Schweiz wiedergibt (*CH2018, 2018*). Die hohen Temperaturen führen zu verstärkter Gletscherschmelze und zu häufigen, flüssigen, bis in hohe Lagen reichenden Niederschlagsereignissen. Der daraus resultierende, zunehmende Verlust der Speicherefunktion von Schnee und Eis kann zu einer Verschiebung der Abflussspitzen in den Frühlings- und zu einer Wasserknappheit in den Sommermonaten führen (*Haeberli & Hohmann, 2008*). Gerade die alpinen Regionen mit ihren wenig bis inexistenten Grundwasservorkommen sind dabei stark von den sich verändernden Speicher abhängig. Die limitierten externen Einflüsse sowie die gute Datenverfügbarkeit des Hauptgerinnes Lonza machen das Lötschental

daher zu einem geeigneten Studienobjekt, um die Auswirkungen des zu erwartenden Rückgangs der Eis- und Schneebedeckung auf die saisonale Wasserverfügbarkeit zu antizipieren.

Die vorliegende Zusammenfassung repräsentiert einen Auszug des ersten Teils der Masterarbeit «Impacts of current and future deglaciation on water and sediment

2. Gebiet, Daten und Methoden

2.1 Das Untersuchungsgebiet

Das Lötschental ist das grösste nördlich der Rhone gelegene Seitental im Wallis und weist eine Fläche von 145 km² auf.

Der Abfluss der Lonza wird in Blatten durch das BAFU und in Ferden durch die

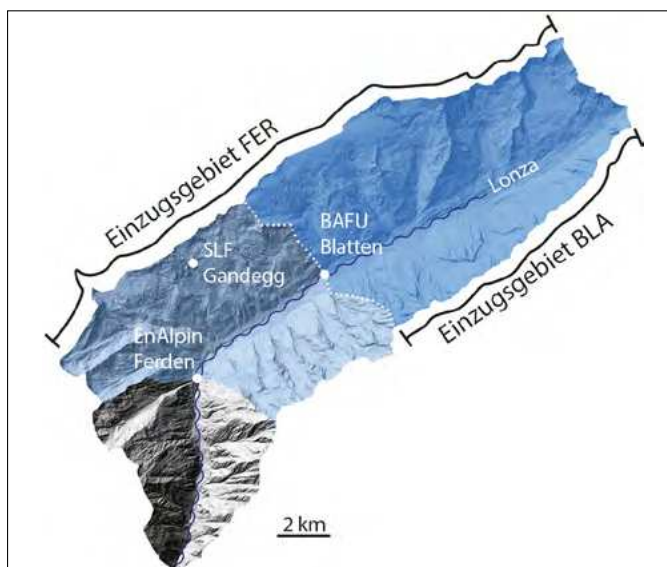


Bild 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Lötschental. Das Einzugsgebiet Blatten (BLA) ist im Einzugsgebiet Ferden (FER) mit eingeschlossen. Hintergrund swissALTI3D DEM.

EnAlpin AG (Betreiberin des lokalen Wasserkraftwerks) gemessen. Daraus ergeben sich zwei Einzugsgebiete (EZ) wobei das EZ von Blatten (BLA, 77,38 km²) in dem von Ferden (FER, 131,78 km²) eingeschlossen ist (Bild 1). Die Lonza wird von mehreren Seitenbächen gespeist, welche teilweise der hydroelektrischen Energiegewinnung

dienen und häufig nahe angezapfter Wasserquellen liegen.

2.2 Daten

Die hydrologischen Daten (Abflusswerte) wurden durch das BAFU (Messstation Lonza in Blatten) wie auch durch EnAlpin AG (Messstation Lonza, Wasserkraftwerk

in Ferden) zur Verfügung gestellt. Die meteorologischen Daten stammen von Meteo-Schweiz von der Messstation Blatten (Niederschlag, Temperatur und Feuchtigkeit) und von der SLF-Station Gandegg (Niederschlag und Temperatur). Da die Niederschlagsmessungen der Station Blatten erst ab 2013 in stündlicher Auflösung ver-

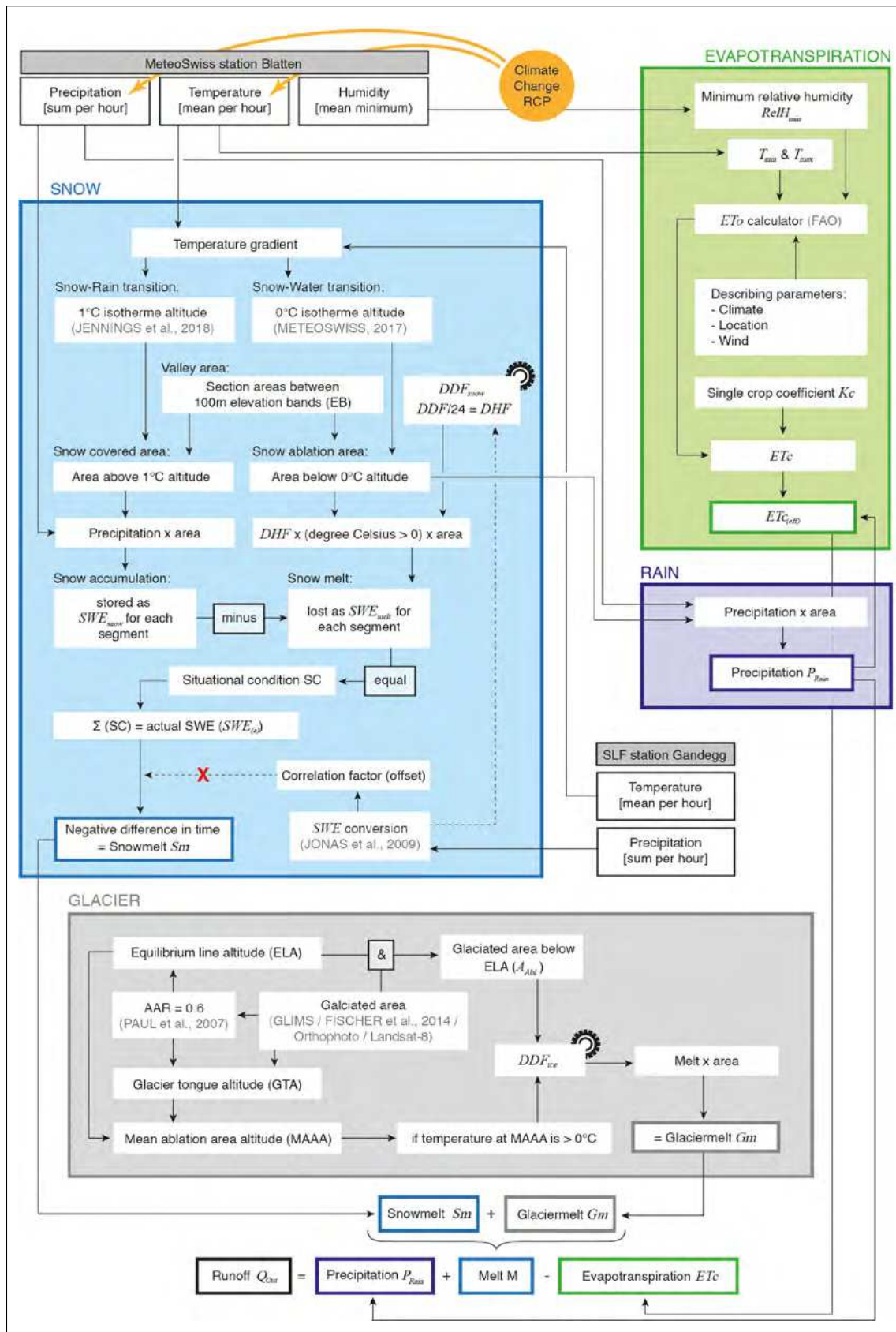


Bild 2: Das verwendete hydrologische Modell. Ausgehend von den Messwerten der Meteorstation Blatten und Daten der Gletscherfläche wurden alle Parameter zur Abflussbestimmung berechnet. Die Faktoren, welche mit einem Zahnrad versehen sind, dienten zur Kalibrierung des Modells.

füßbar sind, dient die Periode 2013–2018 als Referenz. Die vorhandenen Evapotranspiration durch die lokale Vegetation wird nicht gemessen und wird mittels des «ETo Calculators» der FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) bestimmt. Die Berechnungshilfe ist online verfügbar (FAO, 2018) und basiert auf Angaben zur Lage des Standortes und auf einer groben Klassifizierung des Klimas, der Aridität und den Windverhältnissen.

Die verwendeten Gletscherflächen basieren auf dem Inventar SGI2010 (The New Swiss Glacier Inventory) von Fischer et al. (2014). Einzelne Anpassungen in den Flächen wurden vorgenommen, da mit Schutt bedeckte Gletscherflächen z. T. falsch kartiert wurden. Zudem wurde für die Masterarbeit (geomorphologische Untersuchung der Südseite) ein aktuelles DEM (Digital Elevation Model) mittels Helikopter und Photogrammetrie erhoben. Aus den 4036 Fotos konnte eine Pixelauflösung von 26 cm erzielt werden, welche aufgrund der Vergleichbarkeit mit dem Referenzmodell swissALTI3D (2011) auf 2 m hochgerechnet wurde.

2.3 Das Modell

Das hydrologische Modell baut auf der Gleichung von Wulf et al. (2016) auf:

$Q_{\text{out}} = M + P_{\text{Rain}} - \text{ETc}$, wobei $M = S_m + G_m$

Q_{out} Abfluss aus System

M Eintrag durch Schmelze
(S_m : Schneeschmelze/
 G_m : Gletscherschmelze)

P_{Rain} Eintrag durch Regen

ETc Verlust durch Evapotranspiration

Das Modell wird durch eine zeitliche und örtliche Auflösung definiert:

- Um kurzzeitige Niederschlagsveränderungen und deren Beschaffenheit (Wasser oder Schnee) verfolgen zu können, wird eine stündliche Auflösung angewendet, die dann anschliessend auf monatliche Werte hochgerechnet wird.
- Da die Schneegrenze ein zentraler Faktor ist, wird das Tal in 27 Höhenbänder unterteilt (100 m Höhenunterschied). Jedes Band repräsentiert eine homogene Einheit und zieht sich durch das ganze Tal. Örtliche Unterschiede im Auftreten von Niederschlagsereignissen werden vernachlässigt. Bodenparameter und allfällige kurzzeitig vorkommende Grundwasservorkommen werden vernachlässigt. Alle Prozesse verlaufen direkt und ohne zeitliche Verzögerung.

Die grösste Herausforderung besteht darin, aus den klimatischen Daten von MeteoSchweiz in Blatten (Niederschlag, Temperatur und Feuchtigkeit) alle Hauptparameter der Formel exklusiv der Gletscherschmelze (G_m) zu bestimmen. Das Modell beruht auf den folgenden Hauptparametern und kann im Bild 2 betrachtet werden:

- Da bei der Station Blatten der Gesamtniederschlag gemessen und nicht zwischen Schnee und Regen unterschieden wird, muss aus der Gleichung $P_{\text{tot}} = P_{\text{Rain}} + P_{\text{Snow}}$, mittels der am selben Standort gemessenen Temperatur jeweils die Schneefallgrenze und die Beträge der Schneeeakkumulation wie auch deren Ablation modelliert werden. Bei Temperaturen $> 1^\circ\text{C}$ wurde der Niederschlag direkt als P_{Rain} übernommen (Jennings et al., 2018), bei Temperaturen $< 1^\circ\text{C}$ wurde der Niederschlag als Schnee betrachtet. Dies wurde anhand von Schmelzwasseräquivalenz-Berechnungen auf jeweils einem Höhenband zwischen zwei Messzeitpunkten erreicht, wobei für akkumulierte Schneemassen die Annahme gilt, erst bei 0°C in Schmelze (S_m) überzugehen (MeteoSchweiz, 2017). Die tägliche Schmelzrate von Schnee (Degree Day Factor, DDF_{Snow}) wird als Kalibrierungsparameter einbezogen. Die Messstation Gandegg auf 2710 m ü. M. wird als Referenz für die Temperatur- und Schneemodellierungen verwendet.
- Die Evapotranspiration ETc wird durch die Parameter ETo (Pflanzen-Referenz Evapotranspiration) und K_c (spezifische Pflanzen-Eigenschaft) bestimmt. Die detaillierte Berechnung findet mithilfe des ETo-Rechners (FAO, 2018a) statt und beschreibt, wie viel Wasser durch pflanzliche Verdunstung verloren geht. Da BLA und FER unterschiedliche Vegetationen aufweisen, wurden folgende Annahmen getroffen:
 - BLA: $\frac{1}{3}$ Lärchen und $\frac{1}{3}$ Gras
 - FER: $\frac{1}{2}$ Lärchen und $\frac{1}{2}$ Gras
 Die Daten basieren auf einem optimalen Zustand der Pflanzen mit gutem Wasserhaushalt sowie auf konstanten klimatischen Verhältnissen.
- Die Gletscherschmelze (G_m) basiert auf der Höhenlage der Gleichgewichtslinie der Gletscher (ELA), und bestimmt über das Verhältnis der Akkumulations- (Eisaufbau) und der Ablationsfläche (Eisschmelze), wie viel Anteil der gesamten Eisfläche schmilzt (Accumulation Area Ratio, AAR).

Die AAR liegt bei einem Gletscher im Gleichgewicht bei 0,6 (Paul et al. 2007), wobei die aktuell abschmelzenden Gletscher einen niedrigeren Wert aufweisen müssten (je höher der Wert, desto mehr Gletscherfläche gehört zum Akkumulationsgebiet). Da hier aber komplexe Verzögerungsmechanismen aufgrund der Trägheit von Gletscher eingreifen, wird zur Simplifizierung mit einer AAR von 0,6 gerechnet. Die Gletscherschmelze wird durch den Eisschmelz-Parameter DDF_{Ice} , welcher auf der Ablationsfläche angewendet wird, beschrieben und agiert als Kalibrierungsfaktor. Dabei wird der Anteil an Gletscherfläche pro Höhenband berechnet. Die Gletscherzunge des Langgletschers, der tiefste vergletscherte Punkt, liegt auf 2095 m ü. M. Daraus ergibt sich eine berechnete, theoretische ELA von 3000 m ü. M. für das gesamte Tal.

Die Kalibrierung des Modells erfolgt nur mittels Anpassungen von Eis- und Schneeschmelzfaktoren (DDF_{Snow} und DDF_{Ice}), sodass der Abfluss (Q_{out}) mit den Messwerten der Lonza (Referenzperiode 2013–2018) übereinstimmt. Die Kongruenz wird dabei durch den Nash-Sutcliffe Koeffizient (NSE) abgebildet, welcher die Unterschiede zwischen dem Modell und der Messung mit Werten zwischen 1 (perfekte Übereinstimmung) und minus unendlich beschreibt, wobei Werte < 0 als nicht brauchbar gewertet werden (Moriassi et al., 2007).

2.4 Zukunft

Um die Zukunftsperspektiven modellieren zu können, werden zukünftige Gleichgewichtszustände gemäss der verwendeten Klimaszenarien angewendet, da ein dynamisches Modell den Rahmen der Arbeit gesprengt hätte. Dies zieht folgende Annahmen mit sich:

- Die Gletscher werden als homogene Flächen gewertet und besitzen keine räumliche Geometrie. Berechnungen basieren nur auf Oberflächenausdehnungen (Flächenanteil pro 100 m Höhenband).
- Es werden keine Veränderungen in der Oberflächenbeschaffenheit wie auch in der Fließgeschwindigkeit miteinbezogen.
- Die Schmelze wird als das Resultat des angewendeten Eis-Schmelzfaktors (DDF_{Ice}) auf die betroffene Fläche beschrieben.

Da finale Gleichgewichtszustände für die Teileinzugsgebiete Blatten (BLA) und Ferden (FER) modelliert werden, werden die RCP-

Medianwerte von CH2018 für das Jahr 2085 direkt auf das Modell und dessen stündliche Datenmessreihe von 2013 bis 2018 angewendet (Temperatur und Niederschlag). Aus diesen Angaben ergeben sich alle weiteren Parameter, exklusiv der Gletscherschmelze (Gm). Da Gm auf der Ablationsfläche und somit auf der Position der Gleichgewichtslinie (ELA) basiert, wird

eine ELA-Höhenveränderung von 170 m pro Grad Erwärmung angewendet. Dieser Wert basiert auf dem Mittelwert diverser wissenschaftlicher Publikationen (Rabatel et al., 2013; Foster & Rahmstorf, 2011; Kuhn, 1980; Paul et al., 2007). Auf den Temperaturveränderungen aufbauend und in Betrachtung der gesamten Gletscherfläche (Fischer et al., 2014), sowie einer AAR von 0,6 (Paul

et al., 2007) kann die Akkumulationsfläche definiert werden. Dabei wird angenommen, dass oberhalb der ELA keine Schmelzprozesse auftreten.

Um die zukünftige Ablationsflächenverteilung pro Höhenband modellieren zu können, wird eine prozentuale Verteilung gegenüber der Ausgangssituation angenommen. Dies wird in der Bild 3 dargestellt.

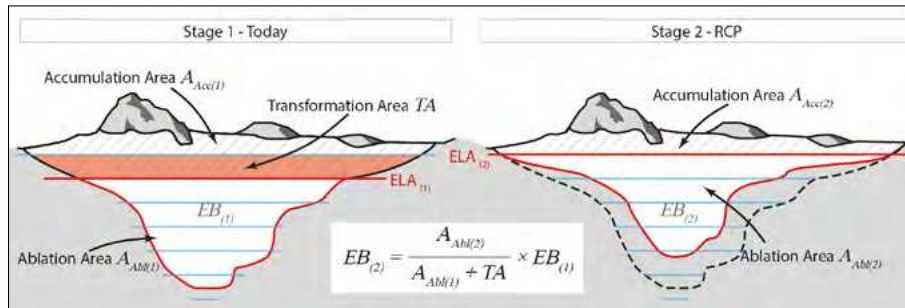


Bild 3: Um die Verzögerung der Gletscherschmelze abbilden zu können, wurde der abgebildete Prozess angewendet. Dabei wurde pro 100m Höhenband (EB=elevation band) die Gletscherfläche nach einer Verschiebung der Gleichgewichtslinie berechnet.

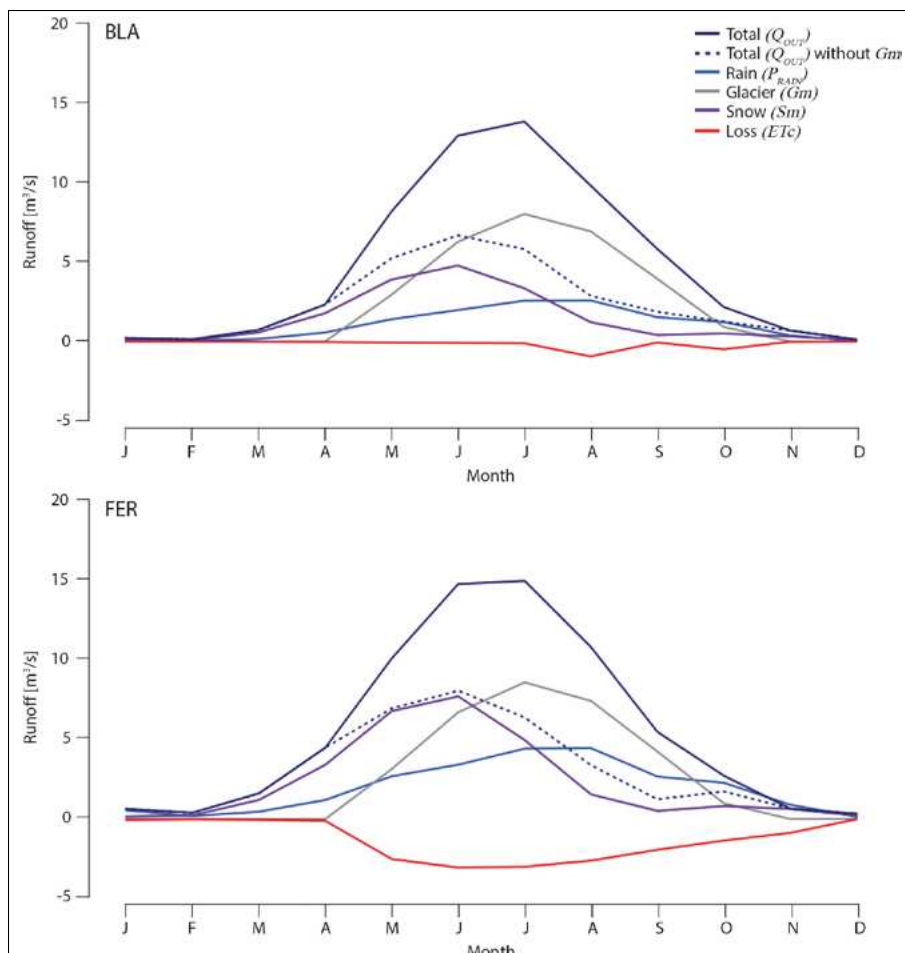


Bild 4: Abflussmodellierung der Lonza mit dem hydrologischen Modell (Bild 2) entsprechend der Situation heute. Dargestellt sind die beiden Einzugsgebiete Blatten (oben) und Ferden (unten), basierend auf der gemittelten Messreihe zwischen 2013–2018. Nebst dem Gesamtabfluss (dunkelblau) sind die Unterkategorien Regen (blau), Gletscherschmelze (grau), Schneeschmelze (violett) und Evapotranspiration (rot) dargestellt. Die gepunktete Linie zeigt den Abfluss heute ohne Gletscherschmelze.

3. Situation heute

Die beste Übereinstimmung zwischen dem Modell und den Messwerten für den Abfluss der Lonza konnte mit den Schmelzfaktoren 4 mm/d/°C (DDF_{Snow}) und 9 mm/d/°C (DDF_{Ice}) erreicht werden. Die Jahresverläufe der verschiedenen Komponenten des Gesamtabflusses Q_{out} ist in Bild 4 für Blatten und Ferden dargestellt. Dabei zeigt sich, dass aktuell 71 % des Abflusses in Ferden (FER) von dem Einzugsgebiet Blatten (BLA) kommt und letzteres stärker von der Gletscherschmelze abhängig ist (mit 51 % Gm-Anteil) als FER (46 %). Entsprechend wären die Gesamtabflüsse ohne den Beitrag der Gletscherschmelze etwa 50 % tiefer als heute (gepunktete Linie).

Die Ergebnisse entsprechen weiterer Publikationen (Costa et al., 2018; Farinotti et al., 2011; Seibert et al., 2014) wobei der berechnete NSE mit 0,943 (BLA) und 0,923 (FER) ein «sehr gutes» Resultat beschreibt (Moriasi et al., 2007). Die NSE-Werte sind für die erreichte Modellierung extrem hoch, es wird daher angenommen, dass die verwendete Datenmenge zu klein war und sich die Abweichungen gegenseitig aufheben (Bild 5).

Der für die Schneemodellierung verwendete Schmelzfaktor für Schnee (DDF_{Snow} : 4 mm/d/°C) ist vergleichbar mit ähnlichen Arbeiten (Costa et al., 2018; Rössler et al., 2012; Schäfli et al., 2005; Hock, 2003). Wird die Modellierung mit den Messwerten der SLF-Station auf der Gandegg verglichen, ergibt sich eine um den Faktor 0,3 zu kleine Schneemenge (Bild 6). Dieser Faktor wurde nicht angewendet, da Sm im Gesamtanteil zu gross geworden wäre. Da die Zeitpunkte des Schneedeckenaufbaus wie auch der totalen Schneeschmelze auf 15–30 Tage genau übereinstimmen, wurde angenommen, dass die Referenzstation Gandegg überdurchschnittlich viel Schnee misst (durch Aussagen des SLFs unterstützt, wenngleich auch nicht quantitativ analysiert). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Annahme einer homogenen Niederschlagsverteilung und der Vernachlässigung von weiteren meteorologischen Parametern wie Wind, Sonnenein-

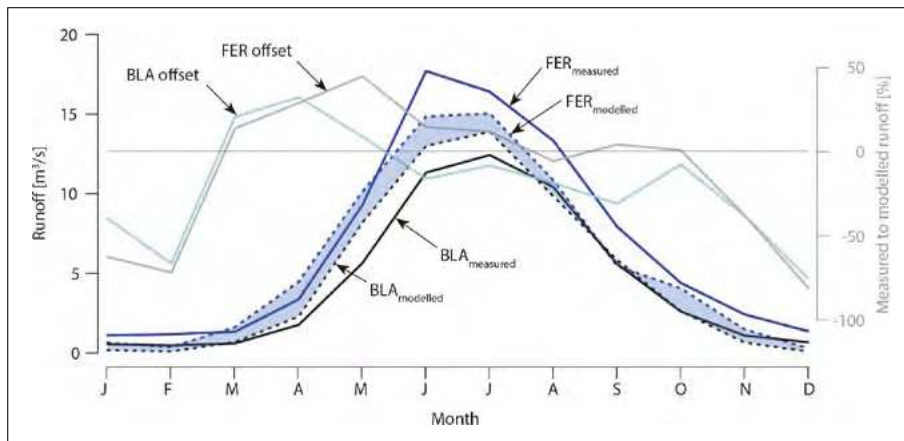


Bild 5: Die Gegenüberstellung der gemessenen und der modellierten Werte für die Periode 2013–2018. Die Differenz der Linien beschreibt jeweils das Abflussvolumen, welches unterhalb von BLA in FER eingetragen wird.

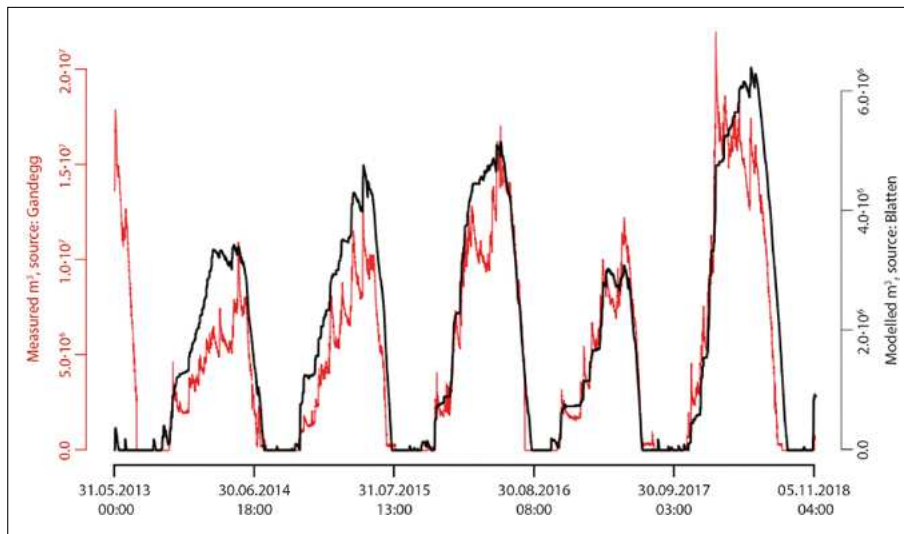


Bild 6: Gegenüberstellung der Schneemodellierung anhand der Messdaten in Blatten und der Messwerte der Station Gandegg (2710 m ü. M.). Die Modellierung bezieht sich auf das Höhenband der Station Gandegg (2700–2800 m ü. M.).

strahlung, Kristallgrößen etc. zu dieser Differenz führen.

Der angewendete Schmelzfaktor für Eis ($DDF_{ice} : 9 \text{ mm/d/}^{\circ}\text{C}$) widerspiegelt die beste Passgenauigkeit zwischen Modell und Messung. Zwar ist der Wert relativ hoch, reiht sich aber in bestehende Arbeiten ein (Costa et al., 2018; Rössler et al., 2012; Schäfli et al., 2005; Hock, 2003). Der aufgrund der Talausrichtung und der damit verbundenen variablen Sonneneinstrahlung hervorgerufene solare Gradient, wird in der angewendeten homogenen Betrachtung des Tales nicht abgebildet. Somit ist im Zusammenhang mit dem hauptsächlich auf der nördlichen Talseite konzentrierten Grossteil der Gletscherfläche dieser erhöhte DDF_{ice} plausibel.

Der einzige Systemverlust neben dem Abfluss wird durch die Evapotranspiration (ETc) repräsentiert und weist aufgrund der unterschiedlichen Vegetation für Ferden (FER) und Blatten (BLA) differenzierte Re-

sultate aus. Hier ist eine Evaluierung aufgrund fehlender Referenzen schwierig. Kleinräumige und höhenbedingte Unterschiede im Wasserverbrauch werden nicht mitberücksichtigt. Es kann demnach die Aussage gemacht werden, dass die erhaltenen Werte plausibel scheinen, jedoch mit grossen Unsicherheiten verbunden sind. Weitere, ETc-spezifische Untersuchungen wären daher nötig.

Schlussendlich kann die Annahme, dass keine Trägheit und somit keine Verzögerung im System vorhanden ist, für kurzzeitige Analysen kritisch sein. Im Modell werden alle Daten auf einen monatlichen Mittelwert hochgerechnet und somit fallen stündliche oder tägliche Verschiebungen nur minimal ins Gewicht.

4. Perspektiven 2085

Für die Modellierung zukünftiger Bedingungen, wurden die Parametereinstellungen

unverändert übernommen und die Temperatur- und Niederschlagsmesswerte durch Daten aus den RCP-Szenarien von CH2018 für das Jahr 2085 ersetzt. Daraus ergaben sich folgende Resultate (Bild 7).

Basierend auf den CH2018 Szenarien

- nimmt der Anteil von Regen (P_{Rain}) um bis zu 30 % zu, sollte sich RCP8.5 einstellen
- findet die Schneeschmelze (Sm) ca. einen Monat früher statt und nimmt in der Intensität ab
- zeigt sich eine Verzögerung der Gletscherschmelze (Gm) aufgrund der grossen Eismassen auf 3000 m ü. M. wobei schon mit dem RCP2.6 Szenario bis zu 50 % des Abflusses wegfallen dürften.
- zeigen beide Einzugsgebiete FER und BLA einen negativen Trend für den totalen Abfluss der Lonza. Gemäss dem RCP8.5-Szenario verlieren BLA $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und FER $2,56 \text{ m}^3/\text{s}$ des durchschnittlichen Jahresabflusses gegenüber heute, was einer Einbusse von $-38,4 \%$ (BLA) und -46% (FER) des Gesamtabflusses entspricht.
- verschiebt sich der maximale Abfluss einen Monat nach vorne, wobei der Sommer weniger und der Winter mehr Abfluss generiert als heute.

Die Temperatur- und Niederschlagsänderungen gegenüber heute werden durch die CH2018-Szenarien definiert. Das Modell bildet diese Prognosen ab. Obwohl in diesen Szenarien die Sommerniederschläge abnehmen und die Winterniederschläge zunehmen werden, zeigt das Modell eine Gesamtzunahme des Winterabflusses von 30 %. Dieser Effekt von zunehmenden Niederschlägen ist bekannt, vielseitig diskutiert und bereits beobachtet (Meehl et al., 2005 & Referenzen und Stoffel & Corona, 2018). Aufgrund des höheren Feuchtigkeitsgehaltes in wärmerer Luft, werden auch die Starkniederschläge zunehmen (CH2018, 2018), wobei diese kurzzeitigen massiven Einträge, gefolgt von trockenen Abschnitten, in dem monatlich aufgelösten Modell nicht abgebildet werden können.

Der verfrühte, durch die Schneeschmelze (Sm) ausgelöste maximale Abfluss wird auch durch CH2018 (2018) beschrieben, jedoch wird in dem hier angewendeten Modell mit einem konstanten Temperaturgradienten von $0,46^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ gerechnet. Stärkere Veränderungen in spezifischen Höhenbereichen (beispielsweise unterhalb von 2000 m ü. M.) werden nicht modelliert, auch hier kommt das linear gehaltene Modell an seine Grenzen.

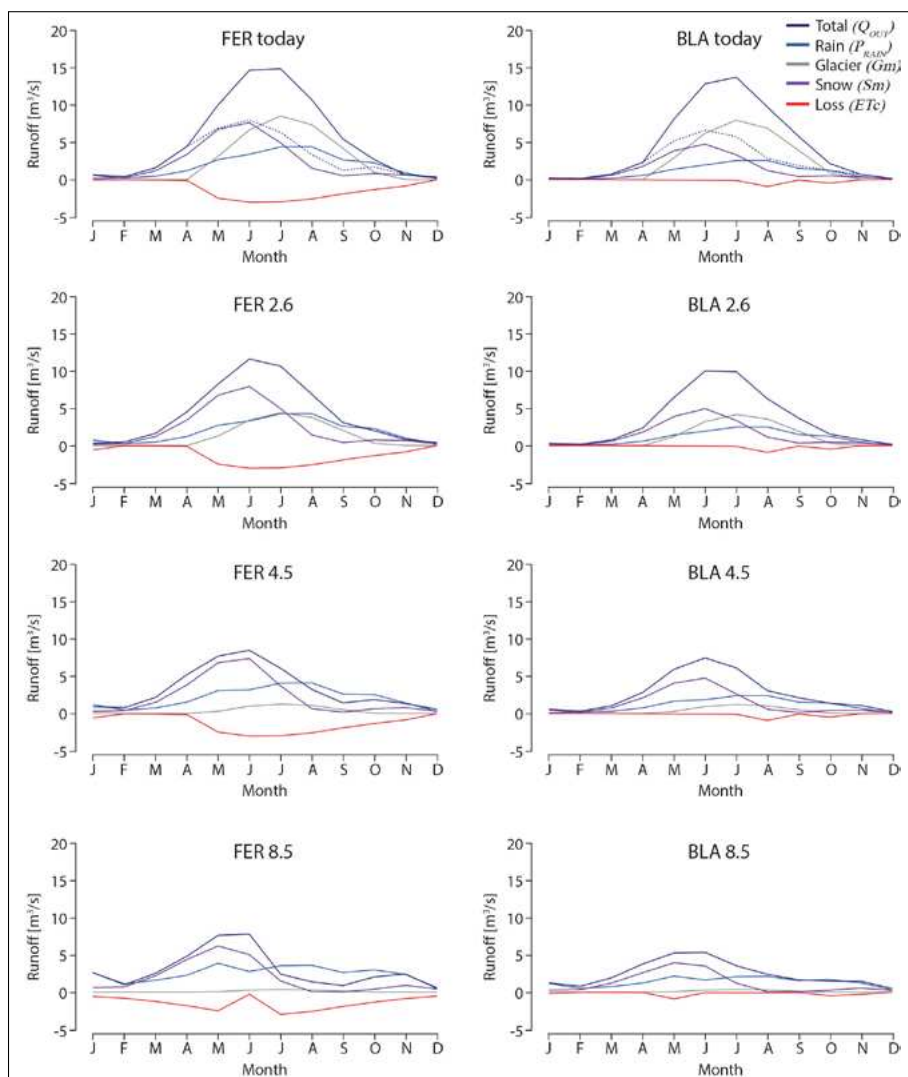


Bild 7: Der Gesamtabfluss und die Abflusskomponenten heute (oben) sowie im Jahr 2085, gemäss den Klimaszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 für die Einzugsgebiete Ferden (linke Spalte) und Blatten (rechte Spalte).

Wie die Schneeschmelze ist die Gletscherschmelze (G_m) temperaturabhängig und mit der ELA verknüpft. Da das Modell aber nicht mit dynamischen, sondern mit statischen Gleichgewichtszuständen rechnet, wird für G_m eine Verzögerung mitgerechnet, die in den anderen Parametern des Modells nicht vorhanden ist. Das Modell berechnet beispielsweise für eine ELA auf 3300 m ü. M. kleine vergletscherte Überreste auf 3000 m ü. M. Würde man hier strikt die Linie eines direkten und nicht verzögerten Systems verfolgen, dürften diese Bereiche im Modell nicht mehr vergletschert sein. Aufgrund dessen, dass solche Szenarien sehr unwahrscheinlich sind, wurde G_m dazu verwendet, die Trägheit des Modells an eine mögliche Realität im Jahre 2085 anzugleichen.

Das Modell wird stark durch den homogen angewendeten Eis-Schmelzfaktor (DDF_{ice}) beeinflusst. Obwohl keine dreidimensionale Eisvolumen miteinbezogen wurde, entspricht das Resultat des voll-

ständigen Verschwindens der Gletscher bis zum Ende des Jahrhunderts (RCP8.5) den Berechnungen von *Farinotti et al. (2011)* und sind, zumindest qualitativ, mit den Arbeiten von *Huss et al. (2010)* und *Linsbauer et al. (2013)* vergleichbar.

Das Modell vernachlässigt jegliche Grundwasservorkommen, basierend auf der Geologie und der teilweise gestuften Geomorphologie kann aber davon ausgegangen werden, dass zumindest kurzzeitige Abflussverzögerungen auftreten könnten. Diese würden allerdings die angestrebte monatliche Modell-Auflösung nicht beeinflussen.

Hinzu kommt, dass die Muster der Evapotranspiration (ET_c) mögliche Fehler in den spezifischen Vegetationswerten anzeigen, dies wurde aber nicht vertieft analysiert. Die ET_c -Werte bzw. deren Parameter wurden nicht auf die unterschiedlichen Klimaszenarien angepasst. *Rössler et al. (2012)* konnten aufzeigen, dass das Lötschental unterhalb von 1800 m ü. M. ver-

mehrt Trockenheit ausgeliefert sein wird. Entsprechende Veränderungen wurden nicht berücksichtigt und könnten zu den Fehlerwerten geführt haben. Eine Anpassung der Baumgrenze wie auch die Änderung der Vegetationsparameter würde hier ein verbessertes Resultat liefern.

Das Modell beschreibt Zukunftsszenarien worin beide Einzugsgebiete einen um etwa 50 % niedrigeren Gesamtabfluss verzeichnen werden. Das modellierte Abflussverhalten ist dabei mit den Ergebnissen von *Farinotti et al. (2011)* im Aletschgebiet vergleichbar. Für das Einzugsgebiet BLA ist eine allgemeine Abflachung der Kurve aufgrund des fehlenden Gletscherwassers erkennbar. In beiden Einzugsgebieten ist im Frühjahr ein Unterschied zwischen RCP4.5 und 8.5 auffällig, der durch den erhöhten Eintrag von Regen (P_{Rain}) und einer Abnahme der Schneeschmelze (S_m) im RCP8.5-Szenario verursacht wird. Aufgrund der unterschiedlichen Höhe der Einzugsgebiete (EZ) wird das Einzugsgebiet von Ferden stärker durch flüssigen Niederschlag (P_{Rain}) und das Einzugsgebiet Blatten stärker durch festen Niederschlag und dessen Schmelze (S_m) beeinflusst.

5. Fazit

Die Wasserverfügbarkeit im Lötschental wird sich zukünftig stark verändern. Im Jahr 2085 werden die vergletscherten Einzugsgebiete 70 % ihres Jahresabflusses, und die von Niederschlag (Schnee und Regen) dominierten Einzugsgebiete um die 40 % verlieren (RCP8.5). Während für den Winter eine leichte Zunahme des Abflusses erwartet wird, werden die Sommer- und Herbstmonate deutlich trockener (Juli: -74 % BLA/-83 % FER). Für den Wintertourismus kann dies ein Vorteil sein, jedoch weisen die steigenden Temperaturen auf vermehrten flüssigen Niederschlag hin, was wiederum die künstliche Schneeproduktion beeinflussen dürfte.

Der höhere Anteil an flüssigem Niederschlag mit verminderter Speicherkapazität durch fehlende Gletscher dürfte in Zukunft zu einer Wasserverknappung im Tal führen, speziell in den Sommermonaten. Der Sommer birgt dabei die grössten Gefahren bezüglich Wasserknappheit. Mit -50 % im Durchschnitt und bis zu -80 % im Sommer deutet das Einzugsgebiet von Blatten grosse Veränderung an. Ein langfristig ausgelegtes, nachhaltiges Wassermanagement, eventuell kombiniert mit Wasserrückhaltebecken oder anderen Versorgungssystemen, dürften nötig werden, um sich an diese zukünftigen Bedingungen anzupassen.

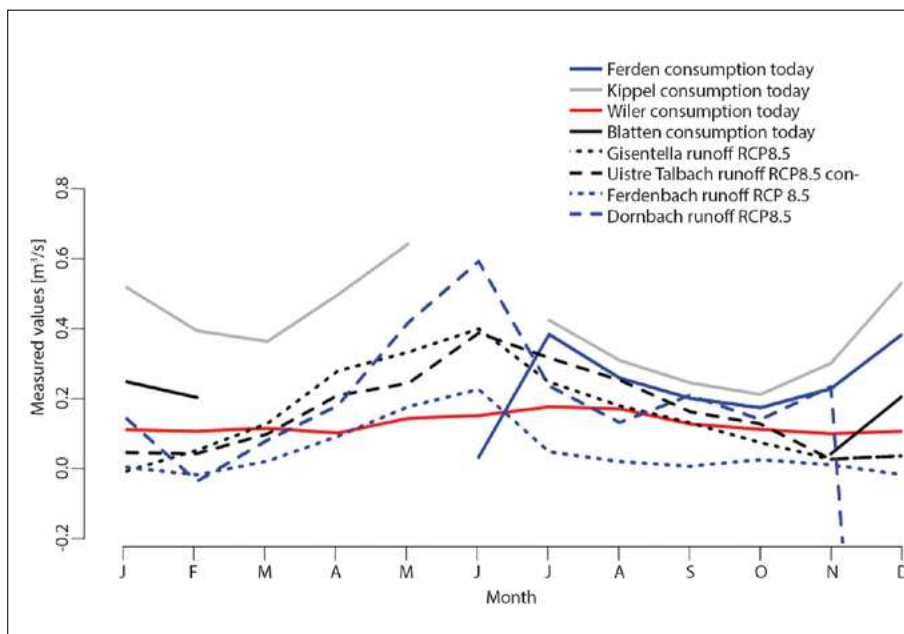


Bild 8: Die Gegenüberstellung zwischen dem gemessenen, aktuellen Wasserverbrauch der Gemeinden (ausgezogene Linien) und den modellierten Nebenflüssen unter dem RCP8.5-Szenario.

In Bild 8 werden die Verbrauchszahlen mit den weiterführenden Modellierungen, mit Einbezug der Nebenflüsse, verglichen. Auch wenn die Daten nicht vollständig sind und die Berechnungen grosse Unsicherheiten aufweisen, können kritische Phasen im Winter und im Sommer ausgemacht werden.

Basierend auf CH2018 (2018) wird das Lötschental zukünftig mit klimatischen Veränderungen konfrontiert: längere Trockenperioden gefolgt von kurzen Starkniederschlägen dürften die Sommer prägen. Aufgrund der monatlichen Auflösung des Modells, konnten solche Phänomene allerdings nicht abgebildet werden.

Schlussendlich kann gesagt werden, dass die Modellierungen die allgemein zu erwartenden Prognosen bezüglich Wasserverfügbarkeit stützen und dass grössere Herausforderungen im Bereich des Wasserhaushaltes auf das Lötschental zukommen werden.

Quellen:

CH2018 (2018). CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp., ISBN: 978-3-9525031-4-0.
Costa, A., Molnar, P., Stutenbecker, L., Bakker, M., Silva, T.a., Schlunegger, F., Lane, S.n., Loizeau, J.-J., Girardclos, S. (2018). Temperature signal in suspended sediment export from an Alpine catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 509-528. <https://doi.org/10.5194/hess-22-509-2018>.
FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018). ETo Calculator. [http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/\(request:07.09.18\)](http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/(request:07.09.18))
Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A., Funk, M. (2011). Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ensembles scenarios. *Hydrological Processes*, 26(13), 1909–1924. <http://doi.org/10.1002/hyp.8276>
Fischer, M., Huss, M., Barboux, C., & Hoelzle, M. (2014). The New Swiss Glacier Inventory SGI2010: Relevance of Using High-Resolution Source Data in Areas Dominated by Very Small Glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4), 933–945. <http://doi.org/10.1657/1938-4246-46.4.933>
Foster, G., & Rahmstorf, S. (2011). Global temperature evolution 1979–2010. *Environmental Research Letters*, 6(4), 044022. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/044022>
Haeberli, W., & Hohmann, R. (2008). Climate, Glaciers and Permafrost in the Swiss Alps 2050: scenarios, consequences and recommendations. *Proceedings Ninth International Conference on Permafrost*, 1(July), 607–612.
Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 282(1-4), 104–115. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00257-9](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9)
Huss, M., Juvet, G., Farinotti, D., & Bauder, A. (2010). Future high-mountain hydrology: A new

parameterization of glacier retreat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(5), 815–829. <http://doi.org/10.5194/hess-14-815-2010>
Jennings, K. S., Winchell, T. S., Livneh, B., & Molotch, N. P. (2018). Spatial variation of the rain-snow temperature threshold across the Northern Hemisphere. *Nature Communications*, 9(1), 1–9. <http://doi.org/10.1038/s41467-018-03629-7>.
Kuhn, M. (1980). Climate and glaciers, *IAHS* 131, 3-20.
Linsbauer, A., Paul, F., Machguth, H., & Haeberli, W. (2013). Comparing three different methods to model scenarios of future glacier change in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 54(63), 241–253. <http://doi.org/10.3189/2013aog63a400>
Meehl, G. A., Arblaster, J. M., & Tebaldi, C. (2005). Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations. *Geophysical Research Letters*, 32(18), 1–4. <http://doi.org/10.1029/2005GL023680>
MeteoSchweiz (2019). Klimabulletin Jahr 2018. Zürich.
Meteoswiss (2017). Schneegrenze / Schneefallgrenze. [https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/wetter/wetterbegriffe/schneegrenze-schneefallgrenze.html\(request:15.01.2019\)](https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/wetter/wetterbegriffe/schneegrenze-schneefallgrenze.html(request:15.01.2019)).
Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *50(3)*, 885–900.
Nyfeler, M. (2019). Impacts of current and future deglaciation on water and sediment availability in the Lötschental, Valais. Master's Thesis, University of Zurich. <https://lean-gate.geo.uzh.ch/prod/typo3conf/ext/qf4/Classes/Api/download.php?s=5f2d1e03a468f>
Paul, F., Maisch, M., Rothenbühler, C., Hoelzle, M., & Haeberli, W. (2007). Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling. *Global and Planetary Change*, 55(4), 343–357. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.08.003>.

Rabatel, A., Letréguilly, A., Dedieu, J. P., & Eckert, N. (2013). Changes in glacier equilibrium-line altitude in the western Alps from 1984 to 2010: Evaluation by remote sensing and modeling of the morphotopographic and climate controls. *Cryosphere*, 7(5), 1455–1471. <http://doi.org/10.5194/tc-7-1455-2013>
Rössler, O., Dieckrüger, B., & Löffler, J. (2012). Potential drought stress in a Swiss mountain catchment. *Ensemble forecasting of high mountain soil moisture reveals a drastic decrease, despite major uncertainties. Water Resources Research*, 48(4), 1–19. <http://doi.org/10.1029/2011WR011188>
Schaeffli, B., Hingray, B., Niggli, M., & Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(1), 73–117. <http://doi.org/10.5194/hessd-2-73-2005>
Seibert, J., Jenicek, M., Huss, M., & Ewen, T. (2014). Snow and Ice in the Hydrosphere. *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394849-6.00004-4>
Stoffel, M., & Corona, C. (2018). Future winters glimpsed in the Alps. *Nature Geoscience*, 11(7), 458–460. <http://doi.org/10.1038/s41561-018-0177-6>
Wulf, H., Bookhagen, B., & Scherler, D. (2016). Differentiating between rain, snow, and glacier contributions to river discharge in the western Himalaya using remote-sensing data and distributed hydrological modeling. *Advances in Water Resources*, 88, 152–169. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.12.004>

Autor:

Matthias Nyfeler, Geographisches Institut Universität Zürich, matthias@nybu.ch
Dr. Holger Frey, Geographisches Institut Universität Zürich, holger.frey@geo.uzh.ch
Prof. Dr. Christian Huggel, Geographisches Institut Universität Zürich, christian.huggel@geo.uzh.ch